

# 底层放空对黄村水库 N、P、Mn、Fe 含量的影响

王远飞<sup>1,2</sup>, 周存通<sup>1,2</sup>, 林洁<sup>3</sup>, 樊晓丽<sup>2</sup>, 林植华<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 丽水学院生态学院, 浙江 丽水 323000)

(3. 丽水市水资源开发有限公司, 浙江 丽水 323000)

**[摘要]** 近几十年来, 浅层湖泊、水库的水质在世界范围内受到关注. 本研究探究了黄村水库底层放空对水质的影响. 结果表明, 底层放空前, 方差分析结果显示, 底层水和中层水之间 Fe、P 差异不显著; Mn 和 N 的含量差异显著, 底层水中的含量均显著高于中层水. 放空前后监测物的方差分析比较显示, 水库底层水 Fe、Mn、P、N 差异均不显著; 水库中层水 Fe、Mn、P 差异均不显著, N 的含量差异显著, 放空后中层水 N 含量显著增加. 回归分析结果表明, 水库中 Fe 和 P 含量随时间增加显著, Mn 和 N 含量随时间增加不显著, 但从长远变化趋势来看, 水库中 Mn 和 N 含量呈增加趋势. 在放空洞排水过程中, Fe、Mn、P、N 的自然增加率均大于减少率, 表明放空洞排水不能抵消由外部因素带入水库的营养盐.

**[关键词]** 黄村水库, 底层放空, 水质, 外源负荷

**[中图分类号]** Q149 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2020)03-0136-05

## Effect of Bottom Water Release on the Contents of N, P, Mn and Fe in Huangcun Reservoir

Wang Yuanfei<sup>1,2</sup>, Zhou Cuntong<sup>1,2</sup>, Lin Jie<sup>3</sup>, Fan Xiaoli<sup>2</sup>, Lin Zhihua<sup>2</sup>

(1. School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China)

(3. Lishui Water Resources Development Co., Ltd, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Water quality in shallow lakes has suffered worldwide in recent decades. This study explored the effect of the bottom water releasing of huangcun reservoir on water quality. The results showed that before the bottom water was released, the analysis of variance showed that there was no significant difference in Fe and P between the bottom water and the intermediate water. The concentration of Mn and N was significantly different, and the concentration of the bottom water was significantly higher than that of the intermediate water. The variance analysis of the detection substances before and after water releasing showed that the difference of Fe, Mn, P and N in the bottom water was not significant. The difference of Fe, Mn and P in the intermediate water was not significant while the difference of N concentration was significant. The results of regression analysis showed that the Fe and P contents increased significantly with time, while the Mn and N contents did not increase significantly with time, but from a long-term trend, the Mn and N contents showed an increasing trend. The natural increasing rate of Fe, Mn, P and N was greater than the decreasing rate in the process of water releasing, which showed that the water releasing cannot offset the nutrients brought into the reservoir by external factors.

**Key words:** Huangcun reservoir, bottom water releasing, water quality, external loading

近年来, 浅层湖泊、水库的水质在世界范围内受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>. 随着水库使用年份的增加, 由集雨范围内冲刷下来的泥土、水体悬浮物、低等水生动植物及其未被完全分解的残渣等物质日积月累, 而形成厚实的水库底泥, 底泥在湖泊和水库的营养盐循环中起着重要作用<sup>[2]</sup>.

氮(N)作为一种主要的藻类营养盐, 对水质起着决定性的作用<sup>[1]</sup>, 被认为是富营养化和浮游植物生长的限制因素之一<sup>[3-4]</sup>. 在水生环境中, 由于浮游生物碎片, 过量的 N 通常集中在悬浮颗粒物中<sup>[5]</sup>. 大部分

收稿日期: 2020-05-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270443)、丽水市科技局重点研发计划项目(20150406、SH2017001).

通讯作者: 林植华, 教授, 研究方向: 生态学. E-mail: zhlin1015@126.com

悬浮颗粒物沉积在底泥上,底泥成为 N 的内部来源<sup>[6-7]</sup>。

底泥沉积物中的磷(P)与铁元素(Fe)存在相互作用<sup>[2]</sup>。氧化条件下,溶解的 P 吸附在  $\text{Fe}^{3+}$  上, $\text{Fe}^{3+}$  与沉积物结合并随沉积物运输<sup>[8]</sup>。还原条件下,深层沉积物中含有比沉积物-水界面更多的可溶性磷酸盐<sup>[9]</sup>。该浓度梯度诱导可溶性磷酸盐从沉积物中的还原区扩散到氧化区,或沉积物-水界面上方。沉积物中 P 的浓度以及存在形式都会影响 P 向上层水体释放。此外,P 还可以吸附到铝、锰、钙矿物上或者以有机形式存在。与氢氧化铁相反,铝氧化物对氧化还原不敏感<sup>[1]</sup>,并且已经表明  $\text{Al}/\text{Fe}>3$  或  $\text{Al}/\text{P}>25$  的摩尔比阻止 P 从沉积物中释放<sup>[10-11]</sup>。自然水体中锰(Mn)以溶解性和不溶性的形式存在,二价锰主要存在于水体中,可与氯离子形成络合物,与硫离子形成难溶于水的化合物沉积到沉积物表层。此外,Mn 能够被 P 吸附,还能充当有机质降解过程中的氧化剂<sup>[12]</sup>。

已经评估并应用了几种底泥处理技术,包括封盖<sup>[13-14]</sup>、植物修复<sup>[15-16]</sup>和环境疏浚<sup>[17]</sup>等,以减少内部营养盐负荷,各有一定的优缺点<sup>[18-19]</sup>。本研究通过历史数据和现场检测,研究放空洞排水前后各水层营养盐浓度的动态变化,探究底层放空对水质的影响,以期改善水库水质提供可行的技术方法,并为水资源管理者提供参考数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

黄村水库位于浙江省丽水市黄村乡,坐标东经  $118^{\circ}41'$ ~ $120^{\circ}26'$  和北纬  $27^{\circ}25'$ ~ $28^{\circ}57'$  之间。该水库正常蓄水位 149.20 m,流域面积  $184.3 \text{ km}^2$ ,水库总库容  $1\,876 \text{ 万 m}^3$ ,年供水总量为  $2\,920 \text{ 万 t}$ ,属中型水库。黄村水库是一座全封闭式的湖泊型水库,地处亚热带季风气候区,温暖湿润,降水丰沛。流域内无工业企业、养殖场,且流域内耕地为梯田和水平地并无顺坡耕作现象,因此流域内无工业污染源、养殖场污染及农业污染<sup>[20]</sup>。

### 1.2 采样和分析

数据采集包括 2010 年 1 月到 2018 年 8 月,对黄村水库底层水和中层水铁、锰、氮、磷进行每月监测,在水库取水口中层水(水深约 15 m)、下层水(水深约 28 m),以饮用水取水口为中心的三角监测点采集水样,每月 1 次;水库水位超过 149.20 m 高程产生溢流时,放空洞开启放水,首次放水时间为 2017 年 6 月 15 日,末次放水时间为 2018 年 8 月 27 日,历时一年有余,流量监测仪(Geolux 300W-QXC)记录放空洞排出水量,记录入径流量。放空洞放水期间,放出水水质每日监测 1 次。

铁含量采用二氮杂菲分光光度法测定;锰含量采用过硫酸铵分光光度法测定;氮含量采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;磷含量采用钼酸铵分光光度法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.3 数据分析

数据用 STATISTICA 统计软件包(verison 6.0)分析。在进一步统计分析前,用 Kolmogorov-Smirnov 和 Bartlet 方法分别检验数据的正态性和方差同质性。用方差分析(ANOVA)以及回归分析来分析相关实验数据。显著性水平设为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与讨论

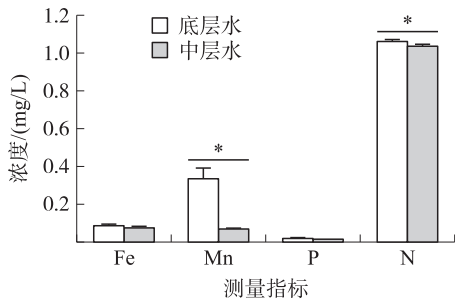
### 2.1 底层放空前底层水和中层水之间 Fe、Mn、P、N 浓度的比较

底层放空前,取各月平均浓度,成对数据的方差分析显示,底层水和中层水之间 Fe( $F_{1,89}=0.92, P=0.340$ )、P( $F_{1,89}=3.46, P=0.066$ )差异不显著;Mn( $F_{1,89}=23.28, P<0.001$ )和 N( $F_{1,89}=9.07, P<0.004$ )的含量差异显著,底层水中的含量均显著高于中层水(图 1)。

根据热力学观点,底泥沉积物中溶解氧(DO)、 $\text{MnO}_x$  等依照产生的自由能顺序依次充当有机质降解过程中氧化剂,放空前,底层处于自然耗氧阶段,由于有机质的氧化分解,造成水体中的 DO 大量消耗,当溶解氧不足时,锰氧化物充当有机质降解的氧化剂而不断被还原释放<sup>[12]</sup>,锰氧化物充当有机质降解的氧化剂而还原进入底层水中,导致底层水 Mn 含量显著高于中层水。底层水中 N 的含量显著高于中层水,主要是由于底泥沉积物中氮浓度可能和底层水存在浓度梯度,分子扩散可能仍然是底泥沉积物-水界面上无机氮通量的主要途径<sup>[22]</sup>。

2.2 底层放空期间,流出水与底层水和中层水 Fe、Mn、P、N 浓度的比较

方差分析显示,流出水与底层水和中层水之间 Fe ( $F_{2,127} = 11.39, P < 0.001$ )、Mn ( $F_{2,127} = 43.46, P < 0.001$ )的含量差异显著,流出水的含量显著高于底层水和中层水,底层水和中层水之间含量差异不显著;流出水与底层水和中层水之间 P 的含量差异不显著( $F_{2,112} = 2.34, P = 0.101$ );中层水与流出水和底层水之间 N 的含量差异显著( $F_{2,112} = 6.70, P < 0.002$ ),流出水和底层水的含量显著低于中层水,流出水和底层水之间差异不显著(图 2)。



\*, 差异显著。

图 1 底层放空前底层水和中层水 Fe、Mn、P、N 浓度的比较  
Fig. 1 The comparison of the concentrations of Fe, Mn, P and N in the bottom and intermediate water before the bottom water releasing

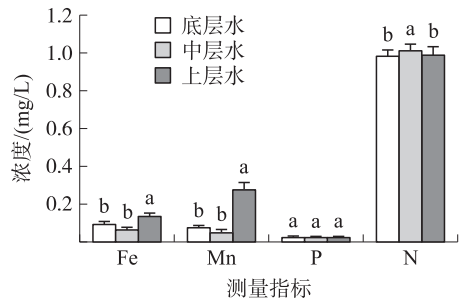


图 2 底层放空期间,流出水与底层水和中层水检测物浓度的比较

Fig. 2 Comparison of the concentration of detection substances in the outlet water, bottom water and the intermediate water during the bottom water releasing

底层水在放空前后监测物的方差分析比较显示,水库底层水 Fe ( $F_{1,103} = 0.01, P = 0.965$ )、Mn ( $F_{1,103} = 3.67, P = 0.058$ )、P ( $F_{1,103} = 0.48, P = 0.489$ )、N ( $F_{1,103} = 1.18, P = 0.280$ ) 差异均不显著;水库中层水 Fe ( $F_{1,103} = 1.03, P = 0.313$ )、Mn ( $F_{1,103} = 1.82, P = 0.180$ )、P ( $F_{1,103} = 2.38, P = 0.126$ ) 差异均不显著, N 的含量差异显著 ( $F_{1,103} = 10.44, P < 0.001$ ), 放空前低于放空后。主要是因为底泥沉积物-水界面的无机氮通量不仅受上覆水和底泥间隙水中营养盐浓度的影响,还受环境温度、溶解氧、氧化还原电位、沉积有机质含量和界面附近微生物活性的影响<sup>[23-28]</sup>。由于底泥有机质氧化过程中的耗氧作用,放空过程中,底泥沉积物-水界面溶解氧浓度减小。以前的研究表明,氧气在底泥沉积物-水界面中的 N 交换中起着至关重要的作用<sup>[29-30]</sup>, 缺氧对浅水湖泊水体中营养盐的重新引入具有重要作用<sup>[31-33]</sup>。底泥沉积物-水界面上的氧气消耗可能加速 N 溶解释放<sup>[34]</sup>, 随着耗氧量的增加,底泥沉积物中增加的不稳定 N 可能溶解到底泥孔隙水中<sup>[34-35]</sup>, 刺激底泥中 N 释放到底层水。放空过程中底层水和中层水的对流作用,导致 N 进入中层水,从而使中层水 N 含量比放空之前显著增加 ( $P < 0.001$ ), 这与 Müller 等<sup>[1]</sup>对氧气控制浅层湖泊沉积物中 N 释放的研究结果一致。

2.3 底层水 N、P、Mn、Fe 含量的时间变化

以时间按月序号编码(1~90)为自变量,回归分析结果表明,从 2010 年 1 月到 2017 年 6 月,水库中 Fe 和 P 含量随着时间的变化呈显著的递增趋势, Mn 和 N 含量随着时间的变化不断增加但相关关系不显著, 底层水 Fe、Mn、P、N 含量的线性拟合图显示如图 3 所示。相关分析显示, Fe 与 Mn ( $r = 0.67, F_{1,88} = 69.83, P < 0.001$ )、P ( $r = 0.27, F_{1,88} = 7.08, P < 0.009$ )、N ( $r = 0.21, F_{1,88} = 4.20, P < 0.043$ ) 之间均具有显著的正相关, Mn、P、N 之间相关关系不显著 (all  $P > 0.05$ )。

在水源中,铁和锰具有独特的反应特性,由此决定着铁和锰的迁移转化规律。铁和锰都是水源中比较常见的金属元素,而且由于性质类似经常共生在一起<sup>[36]</sup>。放空前有机物和氨氮以及其他耗氧性物质加剧了溶解氧消耗,更容易形成底部厌氧环境。在厌氧条件下,水体处于还原状态,三价铁还原为二价铁,四价锰还原为二价锰,使底泥中不溶性的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{MnO}_2$  转化为溶解性二价铁和二价锰向上部水体释放,因此,铁和锰的含量具有显著的正相关( $r = 0.67$ ),这与袁文权等对低浊水源铁锰与

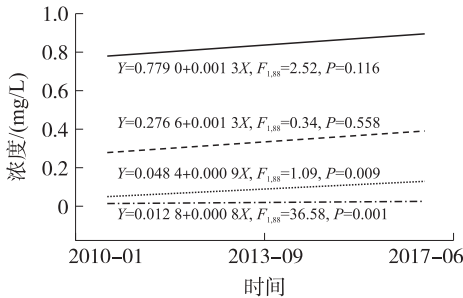


图 3 2010 年 1 月到 2017 年 6 月底层水 Fe、Mn、P、N 含量的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting of the contents of Fe, Mn, P and N in the bottom water from January 2010 to June 2017

磷耦合转化研究铁锰相关系数相似( $r=0.757$ ). 在铁和锰存在的情况下,磷容易与三价铁和四价锰形成不溶性的磷酸盐,以底泥的形式沉淀在底部. 在厌氧条件下,当三价铁和四价锰还原为二价铁和二价锰,磷也以磷酸根的形式释放出来,因此,铁与磷的含量之间也具有正相关性( $r=0.27$ ).

## 2.4 底层放空对黄村水库 N、P、Mn、Fe 含量的影响

2017 年 6 月到 2018 年 8 月,20 个月放空洞总排水量 135.36 万 t,入库径流量为 20 370 万 t. 放空洞排出 Fe、Mn、P、N 的总排放量和由此形成的减少率,以及通过历史数据回归拟合产生的回归系数计算出自然增长率(表 1). 放空洞总排水铁、锰、磷、氮的减少率分别为 0.47%、1.92%、0.11%、0.11%,线性拟合的自然增加率分别为 1.76%、2.52%、0.36%、2.58%,减少率均低于自然增加率. 这表明通过放空洞排水不能抵消集雨区内降雨径流等外部因素带入水库的营养盐,与内源性污染相比,外源性污染是造成水库水质变差的主要原因. 这与 Tang 等<sup>[37]</sup>模拟外部养分减少对中国太湖富营养化藻类水华的影响结果一致. 因此,水库的管理工作在注重控制内源性污染的同时,也应加强对外源性污染的控制.

表 1 黄村水库放空洞排出 Fe、Mn、P、N 的总排放量及对水库的影响

Table 1 The total amount of Fe, Mn, P, N from the discharge hole of Huangcun reservoir and its influence on the reservoir

项目	排出水/(mg/L)	底层水/(mg/L)	差值/(mg/L)	总排放量/kg	减少率/%	自然增加率/%
铁	0.136	0.079	0.056	7.601	0.47	1.76
锰	0.276	0.071	0.205	27.749	1.92	2.52
磷	0.023	0.020	0.003	0.436	0.11	0.36
氮	0.904	0.779	0.125	16.980	0.11	2.58

注:减少率(%)=(差值/底层水)×(放空洞总排水量/区间入库径流量);自然增加率(%)=回归系数×20(月)×100.

## 3 结论

综上所述,通过放空洞排水,对改善水库水质有一定效果,但不能从根本上改善水质;外源性污染是造成水库水质变差的主要原因,水库的管理工作应加强对外源性污染的控制,如水库周边可以增加植被面积,减少由降雨径流带入水库的悬浮颗粒物<sup>[38]</sup>;建议按一定的周期进行完全的放空和底泥疏浚<sup>[39]</sup>.

### [参考文献]

- [1] MÜLLER S, BALDWIN D S, MITROVIC S M, et al. Oxygen and dissolved organic carbon control release of N, P and Fe from the sediments of a shallow, Polymictic Lake[J]. Journal of soils and sediments, 2016, 16(3): 1109–1120.
- [2] CHOWDHURY M, BAKRI D A. Diffusive nutrient flux at the sediment-water interface in Suma Park Reservoir, Australia[J]. Hydrological sciences journal, 2006, 51(1): 144–156.
- [3] CONLEY D J, PAERL H W, HOEARTH R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323: 1014–1015.
- [4] HOWARTH R W, MARINO R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades[J]. Limnology and oceanography, 2006, 51: 364–376.
- [5] SUZUMURA M, KOKUBUN H, ARATA N. Distribution and characteristics of suspended particulate matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan[J]. Marine pollution bulletin, 2004, 49(5–6): 496–503.
- [6] FAN C, ZHANG L, YANG L, et al. Simulation of internal loading of nitrogen and phosphorus in a Lake[J]. Oceanologia limnologia sinica, 2002, 33: 370–378.
- [7] NOWLIN W H, EVARTS J L, VANNI M J. Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir[J]. Freshwater biology, 2005, 50(2): 301–322.
- [8] BOSTROM B, ANDERSEN J, FLEISCHER S J, et al. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface[J]. Hydrobiologia, 1988, 170(1): 229–244.
- [9] MOORE A, REDDY K R. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of lake Okeechobee, Florida[J]. Journal of environment quality, 1994, 23(5): 955–964.
- [10] KOPACEK J, BOROVEC J, HEJZLAR J, et al. Aluminum control of phosphorus sorption by lake sediments[J]. Environmental science and technology, 2005, 39(22): 8784–8789.
- [11] LAKE B A, COOLIDGE K M. Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six maine, USA, lakes[J]. Science of the total environment, 2007, 373(2–3): 534–541.
- [12] 刘丽敏, 顾重武, 曾燕燕. 亭下水库底泥中氮磷及锰的释放特性研究[J]. 浙江水利科技, 2018, 218(4): 4–7.
- [13] HUANG T, XU J, CAI D. Efficiency of active barriers attaching biofilm as sediment capping to eliminate the internal nitrogen

- in eutrophic lake and canal[J]. *Journal of environmental sciences*, 2011, 23(5): 738–743.
- [14] PAN G, DAI L. Reducing the recruitment of sedimented algae and nutrient release into the overlying water using modified soil/sand flocculation-capping in eutrophic lakes[J]. *Environmental science and technology*, 2012, 46(9): 5077–5084.
- [15] GU X, CHEN K, ZHANG L. Preliminary evidence of nutrients release from sediment in response to oxygen across benthic oxidation layer by a longterm field trial[J]. *Environmental pollution*, 2016, 219: 656–662.
- [16] TOYAMA T, NISHIMURA Y, OGATA Y, et al. Effects of planting *Phragmites australis* on nitrogen removal, microbial nitrogen cycling, and abundance of ammonia-oxidizing and denitrifying microorganisms in sediments[J]. *Environmental technology*, 2016, 37: 478–485.
- [17] LIU C, SHAO S G, SHEN Q S, et al. Use of multi-objective dredging for remediation of contaminated sediments: a case study of a typical heavily polluted confluence area in China[J]. *Environmental science pollution research*, 2015, 22(21): 17839–17849.
- [18] ANNADOTTER H, CRONBERG G, AAGREN R, et al. Multiple techniques for lake restoration[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395–396: 77–85.
- [19] ZHONG J C, FAN C X, ZHANG L, et al. Significance of dredging on sediment denitrification in Meiliang Bay, China: A year long simulation study[J]. *Journal environmental sciences*, 2010, 22(1): 68–75.
- [20] 丽水市水利局. 丽水市城市饮用水水源地安全保障规划[Z]. 2008.
- [21] WALTER W G. Standard methods for the examination of water and wastewater[J]. *American journal of public health and the nations health*, 1961, 51(6): 940.
- [22] MORTIMER R J G, KROM M D, WATSON P G, et al. Sediment-water exchange of nutrients in the intertidal zone of the humber estuary, UK[J]. *Marine pollution bulletin*, 1999, 37(3–7): 261–279.
- [23] GARDNER W S, SEITZINGER S P, MALCZYK J M. The effects of sea salts on the forms of nitrogen released from estuarine and freshwater sediments: does ion pairing affect ammonium flux? [J]. *Estuaries*, 1991, 14(2): 157–166.
- [24] HAWKINS J E, FREEMAN C. Rising sea levels-potential effects upon terrestrial greenhouse gas production[J]. *Soil biology and biochemistry*, 1994, 26(3): 325–329.
- [25] DOWRICK D J, HUGHES S, FREEMAN C, et al. Nitrous oxide emissions from a gully mire in mid-wales, UK, under simulated summer drought[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44(2): 151–162.
- [26] RYSGAARD S, THASTUM P, DALSGAARD T, et al. Effects of salinity on  $\text{NH}_4^+$  adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments[J]. *Estuaries*, 1999, 22(1): 21–30.
- [27] VOPEL K, WILSON P S, ZELDIS J. Sediment-seawater solute flux in a polluted New Zealand estuary[J]. *Marine pollution bulletin*, 2012, 64(12): 2885–2891.
- [28] KAISER D, UNGER D, QIU G, et al. Natural and human influences on nutrient transport through a small subtropical Chinese estuary[J]. *Science of the total environment*, 2013, 450: 92–107.
- [29] JING L D, WU C X, LIU J T. The effects of dredging on nitrogen balance in sediment-water microcosms and implications to dredging projects[J]. *Ecological engineering*, 2013, 52: 167–174.
- [30] LIU C, ZHONG J, WANG J, et al. Fifteen-year study of environmental dredging effect on variation of nitrogen and phosphorus exchange across the sediment-water interface of an urban lake[J]. *Environmental pollution*, 2016, 21: 639–648.
- [31] REDDY K R, FISHER M M, IVANOFF D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake[J]. *Journal of environment quality*, 1996, 25(2): 363–371.
- [32] NOWLIN W H, EVARTS J L, VANNI M J. Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir[J]. *Freshwater biology*, 2005, 50(2): 301–322.
- [33] WILHELM S, ADRIAN R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton[J]. *Freshwater biology*, 2008, 53(2): 226–237.
- [34] BRANDES J A, DEVOL A H. Isotopic fractionation of oxygen and nitrogen in coastal marine sediments[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1997, 61(9): 1793–1801.
- [35] DI T, PAQUIN P R. Sediment oxygen demand model: methane and ammonia oxidation[J]. *Journal of environmental engineering*, 1990, 116(5): 945–986.
- [36] 袁文权, 张锡辉, 张光明, 等. 低浊水源铁锰与磷耦合转化研究[J]. *给水排水*, 2003, 29(11): 10–14.
- [37] TANG C, LI Y, ACHARYA K. Modeling the effects of external nutrient reductions on algal blooms in hyper-eutrophic lake Taihu, China[J]. *Ecological engineering*, 2016, 94: 164–173.
- [38] LIU C, CHEN K, WANG Z. Nitrogen exchange across the sediment-water interface after dredging: the influence of contaminated riverine suspended particulate matter[J]. *Environmental pollution*, 2017, 229: 879–886.
- [39] A. 普瓦雷尔. 几座高山水库冲沙管理经验回顾[J]. *水利水电快报*, 2003, 24(21): 10–13.

[责任编辑: 黄 敏]